

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representation of  
The original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 許出願公開番号

特開2000-147392

(P2000-147392A)

(43) 公開日 平成12年5月26日 (2000.5.26)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード (参考)
G 0 2 B 23/26		G 0 2 B 23/26	C 2 H 0 4 0
A 6 1 B 1/00	3 0 0	A 6 1 B 1/00	3 0 0 Y 4 C 0 6 1

審査請求 未請求 請求項の数2 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願平10-328022

(22) 出願日 平成10年11月18日 (1998. 11. 18)

(71) 出願人 000004008

日本板硝子株式会社

大阪府大阪市中央区道修町3丁目5番11号

(72) 発明者 橘高 重雄

大阪府大阪市中央区道修町3丁目5番11号

日本板硝子株式会社内

(72) 発明者 柴山 信男

大阪府大阪市中央区道修町3丁目5番11号

日本板硝子株式会社内

(74) 代理人 100078961

弁理士 茂見 穰

Fターム (参考) 2H040 BA02 CA23

4C061 AA00 BB01 CC00 DD00 FF40

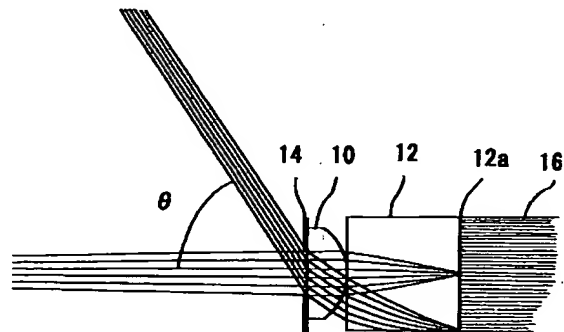
JJ06 NN01 PP11

(54) 【発明の名称】 内視鏡用対物レンズ

(57) 【要約】

【課題】 安価に且つ容易に広視野角の内視鏡用対物レンズを製造できるようにし、それによって内視鏡を用いる各種の観察や操作を効率よく確実に行うことができるようにする。

【解決手段】 均質な屈折率を有する単一の平凸レンズ10と、半径方向に屈折率分布を有する単一の屈折率分布レンズ12の組み合わせからなり、光軸に沿って物体面、均質平凸レンズ、屈折率分布レンズ、像面の順に配置する。屈折率分布レンズは両面共に平面であり、均質平凸レンズは凸面が屈折率分布レンズ側、平面が物体側を向くようにする。屈折率分布レンズ及び均質平凸レンズの諸特性を規定することで、視野角を50°以上とすることができる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 均質な屈折率を有する単一の平凸レンズと、半径方向に屈折率分布を有する単一の屈折率分布レンズとの組み合わせからなり、

(1) 光軸に沿って物体面、均質平凸レンズ、屈折率分布レンズ、像面の順に配置され、

(2) 屈折率分布レンズの両面は平面であり、その屈折率分布は、

$$n(r)^2 = n_0^2 \cdot \{1 - (g \cdot r)^2 + h_4 (g \cdot r)^4 + h_6 (g \cdot r)^6 + h_8 (g \cdot r)^8 + \dots\}$$

の式により表され、

$$1.45 \leq n_0 \leq 1.90$$

$$0.45 \leq n_0 \cdot g \cdot r_0 \leq 0.90$$

但し、

$r$  : 光軸からの距離

$n(r)$  : 光軸からの距離  $r$  の位置での屈折率

$n_0$  : 光軸上での屈折率

$r_0$  : 屈折率分布レンズの有効半径

$g$  : 屈折率分布係数

$h_4, h_6, h_8, \dots$  : 屈折率分布係数

(3) 均質平凸レンズは、その凸面を屈折率分布レンズ側、平面を物体側に配置し、その屈折率  $n$  と凸面の曲率半径  $R$  は、

$$1.45 \leq n \leq 4.00$$

$$0.8 r_0 \leq R \leq 3.0 r_0$$

の各条件を満たし、像面が屈折率分布レンズの端面もしくは端面に近接した位置にあることを特徴とする内視鏡用対物レンズ。

【請求項2】 請求項1において、

(1) 屈折率分布レンズの有効径  $r_0$  が  $0.05 \text{ mm} \leq r_0 \leq 0.5 \text{ mm}$

(2) 均質平凸レンズの屈折率  $n$  が  $1.45 \leq n \leq 2.20$

(3) 均質平凸レンズの凸面の曲率半径  $R$  が  $0.8 r_0 \leq R \leq 1.95 r_0$

(4) 視野角が  $50^\circ$  以上

の各条件を満たす内視鏡用対物レンズ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、内視鏡の先端に装着する対物レンズに関し、更に詳しく述べると、視野角（レンズが像を結ぶ範囲）を  $50^\circ$  以上とすることができる広視野角の内視鏡用対物レンズに関するものである。

【0002】

【従来の技術】内視鏡は、その先端に装着した対物レンズにより実像を作り、その実像を像伝送系によって観察に適した位置まで伝送する構造になっている。像伝送系としては、用途などに応じて、各種のファイババンドル、あるいは通常レンズや屈折率分布レンズによるリレ

ー光学系などが用いられている。

【0003】上記の対物レンズは、その使用状態から、小径で且つ広い視野にわたって像を結ぶことが求められる。球面レンズを数枚組み合わせた光学系であれば、諸収差を良好に補正しつつ広い視野を得ることが可能である。しかし、多数の球面レンズを使う対物レンズは、外径が  $1 \text{ mm}$  以下になるとレンズ研磨や組立調整が困難となりコストが非常に高くなる問題がある。

【0004】そこで、低コストの小径対物レンズとして、半径方向に屈折率分布を有するロッドレンズが使用されている。ロッド状の屈折率分布レンズは、イオン交換等の方法により直径  $1 \text{ mm}$  以下の小径品でも簡単且つ安価に製造できる上、両面共に平面のロッド状なのでレンズ端面の研磨と内視鏡への組み込みや光軸合わせが非常に簡単になるという利点があるからである。

【0005】ロッド状屈折率分布レンズの屈折率分布は、

$$n(r)^2 = n_0^2 \cdot \{1 - (g \cdot r)^2 + h_4 (g \cdot r)^4 + h_6 (g \cdot r)^6 + h_8 (g \cdot r)^8 + \dots\}$$

の式により表される。但し、

$r$  : 光軸からの距離

$n(r)$  : 光軸からの距離  $r$  の位置での屈折率

$n_0$  : 光軸上での屈折率

$r_0$  : 屈折率分布レンズの有効半径

$g$  : 屈折率分布係数

$h_4, h_6, h_8, \dots$  : 屈折率分布係数

をそれぞれ意味する。

【0006】屈折率分布レンズでは、その外周部分は、通常、屈折率分布が設計値から大きくはずれているために、実質的にはレンズとして使用できない。また、レンズ側面の反射による迷光を防止するために外周部分を不透明化する場合もある。よって、屈折率分布レンズの屈折率分布が十分に良好で結像に寄与できる範囲を有効半径  $r_0$  と定義する。そのため、有効半径  $r_0$  はロッドレンズの見掛けの半径と一致するとは限らない。

【0007】ロッド状屈折率分布レンズを対物レンズとして使用する場合、レンズの視野角（レンズ画像を結ぶ範囲） $\theta$  は、

$$\theta = n_0 \cdot g \cdot r_0 \text{ (rad)}$$

によって表される。因みに、後述する比較例に示す対物レンズ（図17参照）では視野角  $\theta$  は  $38.7^\circ$  である。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】内視鏡において対物レンズの視野が広ければ、それだけ対象物を観察できる範囲が広くなり、内視鏡を用いる各種の操作が容易となる。ロッド状屈折率分布レンズの視野角  $\theta$  を大きくするには  $n_0 \cdot g \cdot r_0$  の値を大きくすること、即ち、中心と周辺の屈折率差を大きくする必要がある。ところがロッド状屈折率分布レンズにおける  $n_0 \cdot g \cdot r_0$  の値

は、現在行われている通常のイオン交換技術によって容易に実施できるのは、0.70程度までであるとされている。つまり、視野角 $\theta$ が0.7rad (約40°)を超える広視野のロッド状屈折率分布レンズの製造は、かなり困難であり、視野角を拡大するための障害となっている。

【0009】本発明の目的は、上記のような従来技術の欠点を解消し、安価に且つ容易に製造できる広視野角の内視鏡用対物レンズを提供することである。

【0010】

【課題を解決するための手段】本発明は、均質な屈折率を有する単一の平凸レンズと、半径方向に屈折率分布を有する単一の屈折率分布レンズとの組み合わせからなり、

(1) 光軸に沿って物体面、均質平凸レンズ、屈折率分布レンズ、像面の順に配置され、

(2) 屈折率分布レンズの両面は平面であり、その屈折率分布は、

$$n(r)^2 = n_0^2 \cdot \{1 - (g \cdot r)^2 + h_4 (g \cdot r)^4 + h_6 (g \cdot r)^6 + h_8 (g \cdot r)^8 + \dots\}$$

の式により表され、

$$1.45 \leq n_0 \leq 1.90$$

$$0.45 \leq n_0 \cdot g \cdot r_0 \leq 0.90$$

但し、

$r$  : 光軸からの距離

$n(r)$  : 光軸からの距離 $r$ の位置での屈折率

$n_0$  : 光軸上での屈折率

$r_0$  : 屈折率分布レンズの有効半径

$g$  : 屈折率分布係数

$h_4, h_6, h_8, \dots$  : 屈折率分布係数

(3) 均質平凸レンズは、その凸面を屈折率分布レンズ側、平面を物体側に配置し、その屈折率 $n$ と凸面の曲率半径 $R$ は、

$$1.45 \leq n \leq 4.00$$

$$0.8 r_0 \leq R \leq 3.0 r_0$$

の各条件を満たし、像面が屈折率分布レンズの端面もしくは端面に近接した位置にある内視鏡用対物レンズである。

【0011】本明細書において「屈折率分布レンズの有効半径 $r_0$ 」とは、レンズとして有効に作用する部分の半径を意味している。これは、例えば「光軸上のRMS波面収差量が0.07 $\lambda$ 以下となる範囲」として定義できる。屈折率分布レンズの有効半径 $r_0$ は屈折率分布レンズの屈折率に影響するので、設計上の基準となる数値である。ところが実際に製作した屈折率分布レンズでは、レンズ周辺の屈折率分布が設計値から大きくはずれ、レンズとしての作用をなさないことが多い。例えば実際の外径寸法が1mm $\phi$ のレンズであっても、実際に有効なレンズ径は0.8mm $\phi$ であったりする。その場合、屈折率分布レンズの有効半径 $r_0$ は0.4mm $\phi$ となる。

【0012】本発明では、ロッド状の屈折率分布レンズに均質な屈折率を有する平凸レンズを組み合わせることによって視野を50°以上に拡大することができる。本発明の内視鏡用対物レンズの光路図を図1に示す。先端の均質平凸レンズ10は斜めに入射した光の角度を小さくしてロッド状屈折率分布レンズ12に送り込む機能を果たす。均質平凸レンズ10の前方には開口絞り14を設けて、光軸付近の光のみを透過させる。屈折率分布レンズ12は、その端面12aに実像を形成し、実像はファイババンドル16等によって観察に適したところまで伝達される。図2は、屈折率分布レンズ12のみからなる比較例の光路図である。この比較例と同一の $n_0 \cdot g \cdot r_0$ を使用しているにもかかわらず、本発明の対物レンズは、遙かに広い視野角が得られる。

【0013】本発明で用いる屈折率分布レンズとして、光軸上での屈折率 $n_0$ を $1.45 \leq n_0 \leq 1.90$ としたのは、実際にイオン交換法などにより製作できる範囲を規定したものである。屈折力に対応する $n_0 \cdot g \cdot r_0$ は、 $0.45 \leq n_0 \cdot g \cdot r_0 \leq 0.90$ としている。下限の0.45未満では十分に広い視野角を得ることができない。また、現状のイオン交換技術で容易に達成できる上限は0.7程度であり、将来のガラスの組成改良などを考慮しても、0.90を超えるものは製造が極めて困難である。 $n_0 \cdot g \cdot r_0 = 0.90$ を実現したとしても、屈折率分布レンズ単体での視野角 $\theta$ は0.9rad (約52°)である。

【0014】屈折率分布レンズの有効半径 $r_0$ は、 $0.05\text{mm} \leq r_0 \leq 0.5\text{mm}$ の範囲とすることが望ましい。光学系全体の小型化のため、また収差をできるだけ小さくするためには $r_0$ は0.5mm以下とすることが望ましく、また0.05mm未満とすることは製作がきわめて困難となるからである。

【0015】本発明においては、屈折率分布係数 $h_4, h_6, h_8, \dots$ によって光学系全体の球面収差と像面湾曲を補正している。簡略化のために $h_6$ 以上の高次の項を0とおき屈折率分布レンズの屈折率分布を

$$n(r)^2 = n_0^2 \cdot \{1 - (g \cdot r)^2 + h_4 (g \cdot r)^4\}$$

で近似したときには、 $h_4$ の値は、 $-4 \leq h_4 \leq +3$ の範囲であることが望ましい。 $h_4$ が-4未満、あるいは+3を超える屈折率分布レンズは製作が著しく困難になるからである。

【0016】次に本発明で用いる均質平凸レンズの屈折率 $n$ を $1.45 \leq n \leq 4.00$ としたのは、レンズ材料として光学ガラスやプラスチックのほか、特殊なガラスや屈折率の大きな結晶、半導体なども使用可能なためである。半導体材料は可視光に対して不透明なものが多いが、赤外域では以下のように非常に高い屈折率が利用できる。

$$\text{AlP} \quad n = 3.03$$

AlAs  $n=3.18$

AlSb  $n=3.79$

GaP  $n=3.45$

GaAs  $n=3.62$

GaSb  $n=3.82$

InP  $n=3.40$

(「微小光学ハンドブック」応用物理学会・日本光学会編、朝倉書店発行(1995年)、第224頁)

更に均質平凸レンズの凸球面の曲率半径Rを、屈折率分布レンズの有効半径 $r_0$ を基準として、 $0.8r_0 \leq R \leq 3.0r_0$ としたのは、Rが $0.8r_0$ 未満では収差補正が困難になるし、 $3.0r_0$ を超えると視野を広くとることができなくなるからである。

【0017】均質平凸レンズの材料として光学ガラスやプラスチックを用いる場合は、屈折率nはおおよそ $1.45 \leq n \leq 2.2$ となるので、凸球面の曲率半径Rの好ましい範囲は、 $0.8r_0 \leq R \leq 1.95r_0$ となる。

【0018】この均質平凸レンズの半径は、それと組み合わせる屈折率分布レンズの半径とほぼ同等とすることが好ましい。小径の均質平凸レンズは、例えば量産可能なボールレンズの一部を研削、研磨することによって半球に近い形状のものでも低コストで製造できるので、全体のコストアップを押さえることができる。

【0019】これらのことから、本発明に係る内視鏡用対物レンズのより好ましい条件は、

(1) 屈折率分布レンズの有効径 $r_0$ が $0.05\text{mm} \leq r_0 \leq 0.5\text{mm}$

(2) 均質平凸レンズの屈折率nが $1.45 \leq n \leq 2.20$

(3) 均質平凸レンズの凸面の曲率半径Rが $0.8r_0 \leq R \leq 1.95r_0$

(4) 視野角が $50^\circ$ 以上

の各条件を満たすようにすることである。

【0020】

【発明の実施の態様】本発明に係る内視鏡用対物レンズを製品化する際には、均質平凸レンズと屈折率分布レンズとを、両者の光軸を一致させた状態で一体化する必要がある。組立構造の一例を図3に示す。組立は次のような手順で行うのがよい。まず図3のAに示すように、予め均質平凸レンズ10の平面側に、板状体の中央

に開口14aを形成した開口絞り14を取り付ける。そして、屈折率分布レンズ12とファイババンドル16を突き合わせた状態で、カバーチューブ18内に収容し、その先端部に前記の開口絞り付きの均質平凸レンズ10を、その凸面が屈折率分布レンズの端面に当接するように装着する。このような方法で容易に組み立てることができる。なお各部材の接着には、例えば紫外線硬化樹脂を塗布し、紫外線を照射することで硬化させる方法が好ましい。

【0021】本発明の対物レンズは、可視光を含む波長 $0.3 \sim 2\mu\text{m}$ 程度の光に対して用いることが望ましい。波長 $0.3\mu\text{m}$ 以下の紫外光はレンズ材料による吸収が大きくなる。また、CCDや撮像管の使用を前提とすると、波長は $2\mu\text{m}$ 以下が適当である。

【0022】本発明は正の屈折率を有するレンズだけで構成されるため、色収差の補正は困難である。しかし、直径 $1\text{mm}$ 以下の小径レンズにおいては、色収差の絶対量も少なくなるので許容することができる。色収差をより小さくするためには、均質平凸レンズに分散の小さい材料、例えばランタン系の光学ガラスなどを用いることが望ましい。勿論、単色光の使用を前提とするのであれば色収差は問題にならない。

【0023】内視鏡の像伝送系としては、用途や使用状態などに応じて、各種のファイババンドルのみならず、通常レンズや屈折率分布レンズによるリレー光学系などであってよい。

【0024】

【実施例】具体的な設計例を比較例(屈折率分布レンズのみを用いた例)と共に表1～表3に示す。各設計値は、設計例13を除いて屈折率分布レンズの有効半径 $r_0$ を1に規格化して表している。なお、設計例13では、MTF値を計算するために長さの単位が $\text{mm}$ となっている。各設計例及び比較例では、屈折率分布レンズの端面にファイババンドルを当接させることを想定して、この面を像面とした。像面の位置は全視野角の画像が平均的に良くなるように定めたので、近軸焦点とは一致していない。

【0025】

【表1】

	設計例1	設計例2	設計例3	設計例4	設計例5
物体高	30	40	25	30	60
物体と平凸レンズの距離	20	20	20	20	20
視野角 $\theta$	56.3°	63.4°	51.3°	56.3°	71.6°
開口絞り半径	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
平凸レンズ屈折率 $n$	1.520	1.900	1.750	1.803	2.200
平凸レンズ曲率半径 $R$	-1.000	-0.800	-1.400	-1.200	-1.800
平凸レンズ厚さ	0.700	0.721	0.978	0.990	1.000
両レンズの間隔	0	0	0	0	0
屈折率分布レンズ半径 $r_o$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
光軸上での屈折率 $n_o$	1.640	1.800	1.700	1.550	1.682
屈折率分布係数 $g$	0.400	0.388	0.350	0.300	0.440
$n_o \cdot g \cdot r_o$	0.656	0.698	0.595	0.465	0.740
屈折率分布係数 $h_a$	-0.982	-4.000	-0.629	-2.529	-0.377
屈折率分布レンズ厚さ	2.007	1.200	2.258	1.782	1.717
焦点距離	1.200	0.758	1.250	1.230	1.007

【0026】

\*20\*【表2】

	設計例6	設計例7	設計例8	設計例9	設計例10
物体高	—	40	40	50	—
物体と平凸レンズの距離	無限大	20	20	20	無限大
視野角 $\theta$	62.0°	63.4°	63.4°	68.2°	56.0°
開口絞り半径	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4
平凸レンズ屈折率 $n$	1.486	1.911	2.200	1.9091	1.9042
平凸レンズ曲率半径 $R$	-1.000	-1.400	-1.600	-1.449	-1.927
平凸レンズ厚さ	1.000	0.929	1.087	0.887	1.146
両レンズの間隔	0	0	0	0	0
屈折率分布レンズ半径 $r_o$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
光軸上での屈折率 $n_o$	1.80	1.800	1.800	1.900	1.450
屈折率分布係数 $g$	0.500	0.388	0.388	0.400	0.500
$n_o \cdot g \cdot r_o$	0.900	0.698	0.698	0.760	0.725
屈折率分布係数 $h_a$	+0.058	-0.799	-0.799	-0.693	0.048
屈折率分布レンズ厚さ	1.802	1.936	1.770	2.006	1.814
焦点距離	0.993	1.050	0.978	1.018	1.163

【0027】

※40※【表3】

	設計例11	設計例12	設計例13	比較例
物体高	40	60	6.50mm	16
物体と平凸レンズの距離	20	20	5.00mm	20
視野角 $\theta$	63.4°	71.6°	52.4°	38.7°
開口絞り半径	0.4	0.4	0.0303mm	0.4
平凸レンズ屈折率 $n$	1.8651	3.82	1.520	—
平凸レンズ曲率半径 $R$	-1.300	-3.00	-0.125mm	—
平凸レンズ厚さ	0.909	2.286	0.087mm	—
両レンズの間隔	0	0	0	—
屈折率分布レンズ半径 $r_0$	1.00	1.00	0.125mm	1.00
光軸上での屈折率 $n_0$	1.650	1.640	1.640	1.640
屈折率分布係数 $g$	0.400	0.400	3.20mm <sup>-1</sup>	0.400
$n_0 \cdot g \cdot r_0$	0.660	0.656	0.656	0.656
屈折率分布係数 $h_0$	-0.905	+0.600	0.00	+0.463
屈折率分布レンズ厚さ	1.750	1.431	0.268mm	4.000
焦点距離	1.070	0.873	0.1495mm	1.525

【0028】各設計例において、視野角は50°以上になっている。特に設計例3以外の設計例においては、55°以上の広視野角化が達成されていることが分かる。

【0029】各設計例の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を図4～図16に示す。また比較例の構成、横収差、像面湾曲及び歪曲を図17に示す。これらの図において、横収差は、光軸上、0.7物体高、1.0物体高について表示している。但し設計例6と設計例10は無限系レンズであるので、光軸上、0.7視野角、1.0視野角について表示している。DY、DXはそれぞれタンジェンシャル、サジタル方向における収差量であり、 $r_0$ を1とする。また、FY、FXは開口絞りにおける光線の通過位置を表し、終端が絞り半径を意味する。像面湾曲はサジタルS及びタンジェンシャルT方向について表され、長さの単位は $r_0$ を1とし、縦軸の終端は像高を意味する。歪曲における横軸の単位は%、縦軸の終端は像高を意味する。なお、構成を示す各図において、符号10は均質平凸レンズ、12は屈折率分布レンズ、12aはその端面（像面位置）、14は開口絞りをそれぞれ示している。

【0030】設計例13については、実際に使われる対物レンズの大きさを考慮して屈折率分布レンズの半径を0.125mmとしてMTF値を計算した。図18に、設計例13について、像面近傍でのMTF値(100-line pair/mm)を示す。Tはタンジェンシャル、Sはサジタル像をそれぞれ表す。この設計例の像面位置は周辺像を重視して設計しており、上記3点でのMTF値は約60%以上を確保している。また、像面位置を光学軸の最良位置（像面からの距離0.1mm）に修正すれば、軸上のMTF値は最大約80%が得られる。

【0031】

20\*【発明の効果】本発明は上記のように、光軸に沿って、物体面、均質な屈折率を有する単一の平凸レンズ、半径方向に屈折率分布を有する単一の屈折率分布レンズ、像面の順に配置し、屈折率分布レンズは両面共に平面であり、均質平凸レンズは凸面が屈折率分布レンズ側、平面が物体側を向くようにし、屈折率分布レンズ及び均質平凸レンズの諸特性を規定した内視鏡用の対物レンズであるから、安価に入手できるレンズの組み合わせにより、小径で且つ視野角を拡大でき、内視鏡を使用する各種の操作や作業を効率よく、容易に行うことが可能となる。

30 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に係る内視鏡用対物レンズの光路説明図。

【図2】比較例の光路説明図。

【図3】本発明に係る内視鏡用対物レンズの一実施例の組立説明図。

【図4】設計例1の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図5】設計例2の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

40 【図6】設計例3の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図7】設計例4の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図8】設計例5の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図9】設計例6の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図10】設計例7の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

\*50 【図11】設計例8の構成、横収差、像面湾曲、及び歪

曲を表す説明図。

【図12】設計例9の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図13】設計例10の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図14】設計例11の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図15】設計例12の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図16】設計例13の構成、横収差、像面湾曲、及び

歪曲を表す説明図。

【図17】比較例の構成、横収差、像面湾曲、及び歪曲を表す説明図。

【図18】像面からの距離に対するMTFの関係を示す図。

【符号の説明】

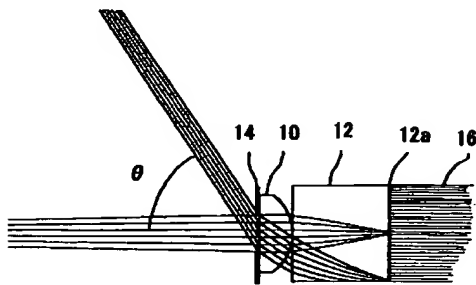
10 均質平凸レンズ

12 屈折率分布レンズ

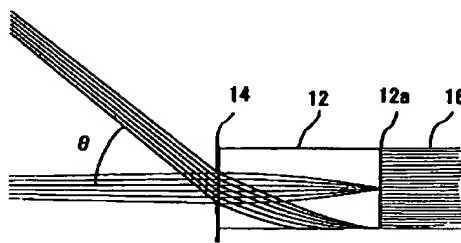
14 開口絞り

10 16 ファイババンドル

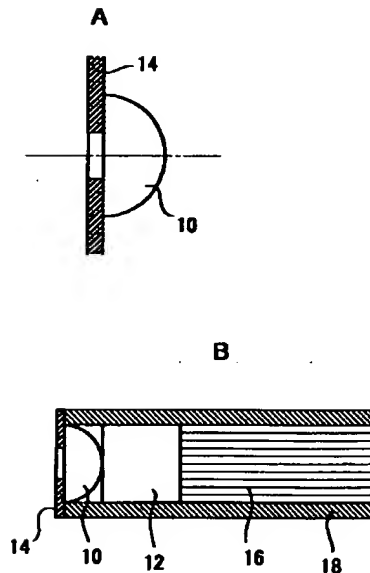
【図1】



【図2】

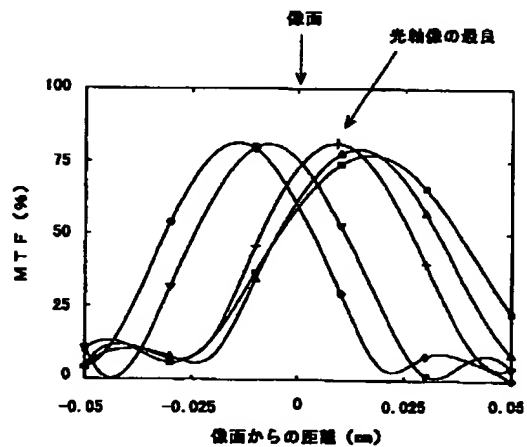


【図3】



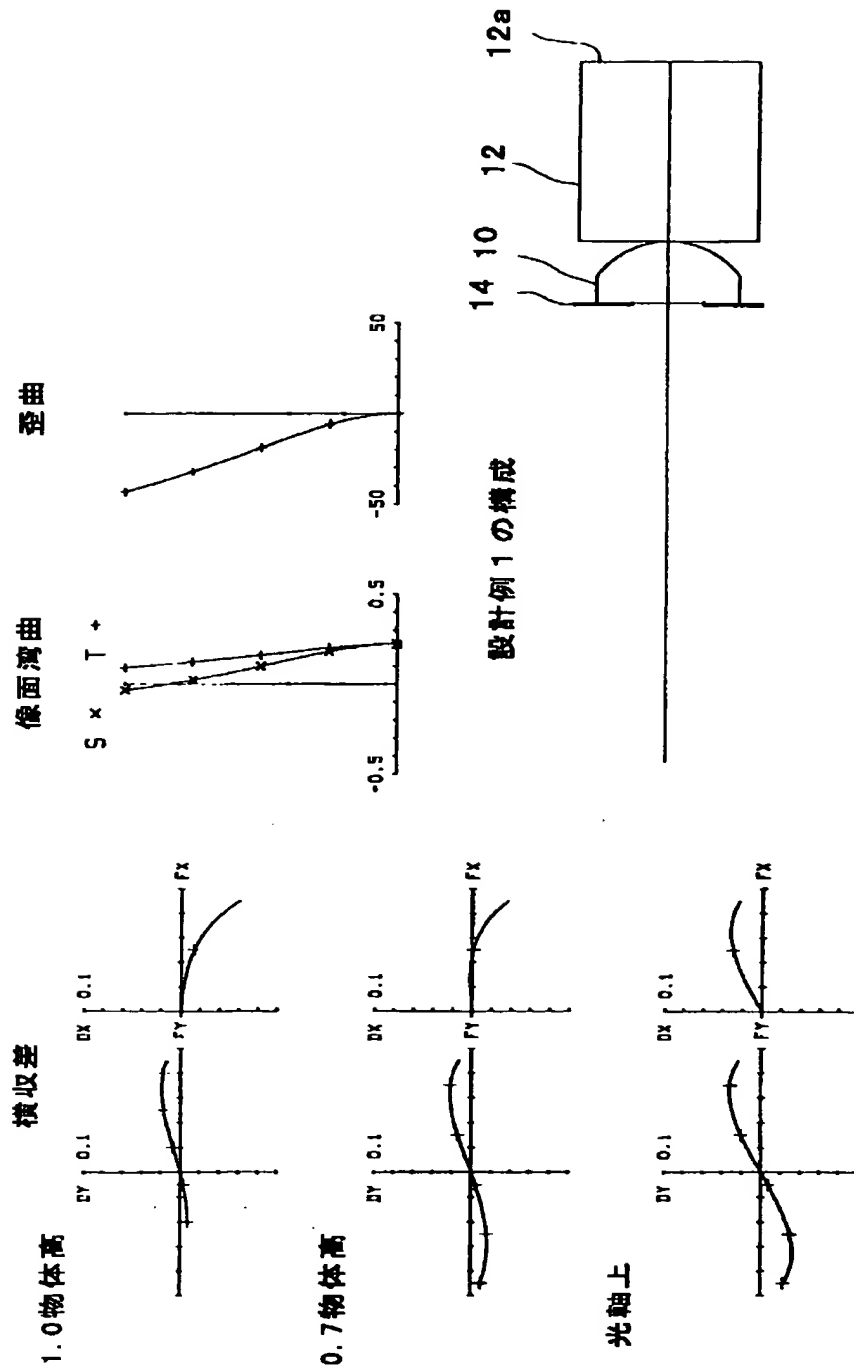
【図18】

光軸上 +  
0.7物体高  $\Gamma = 5^\circ$   
1.0物体高  $\Gamma = 5^\circ$

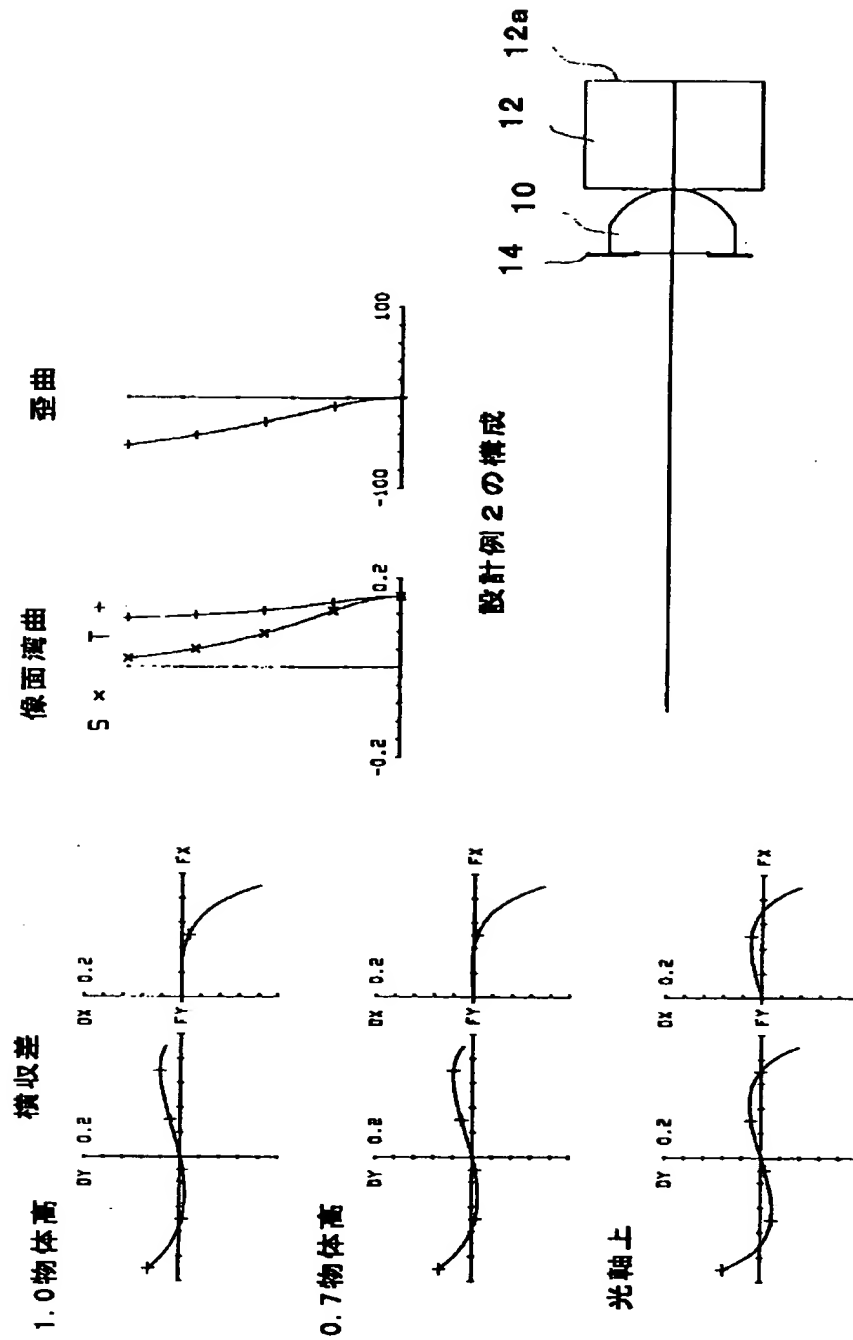




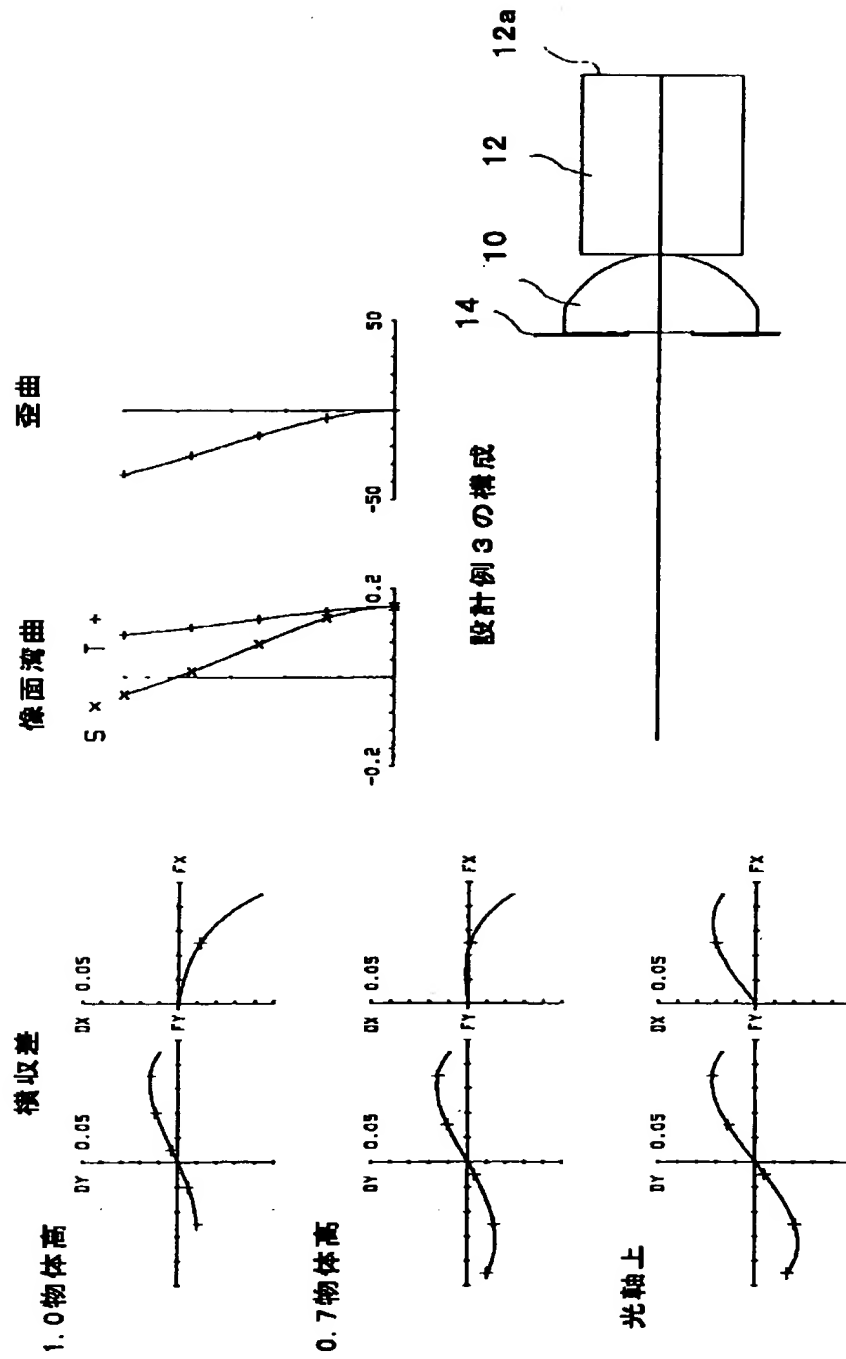
【図4】



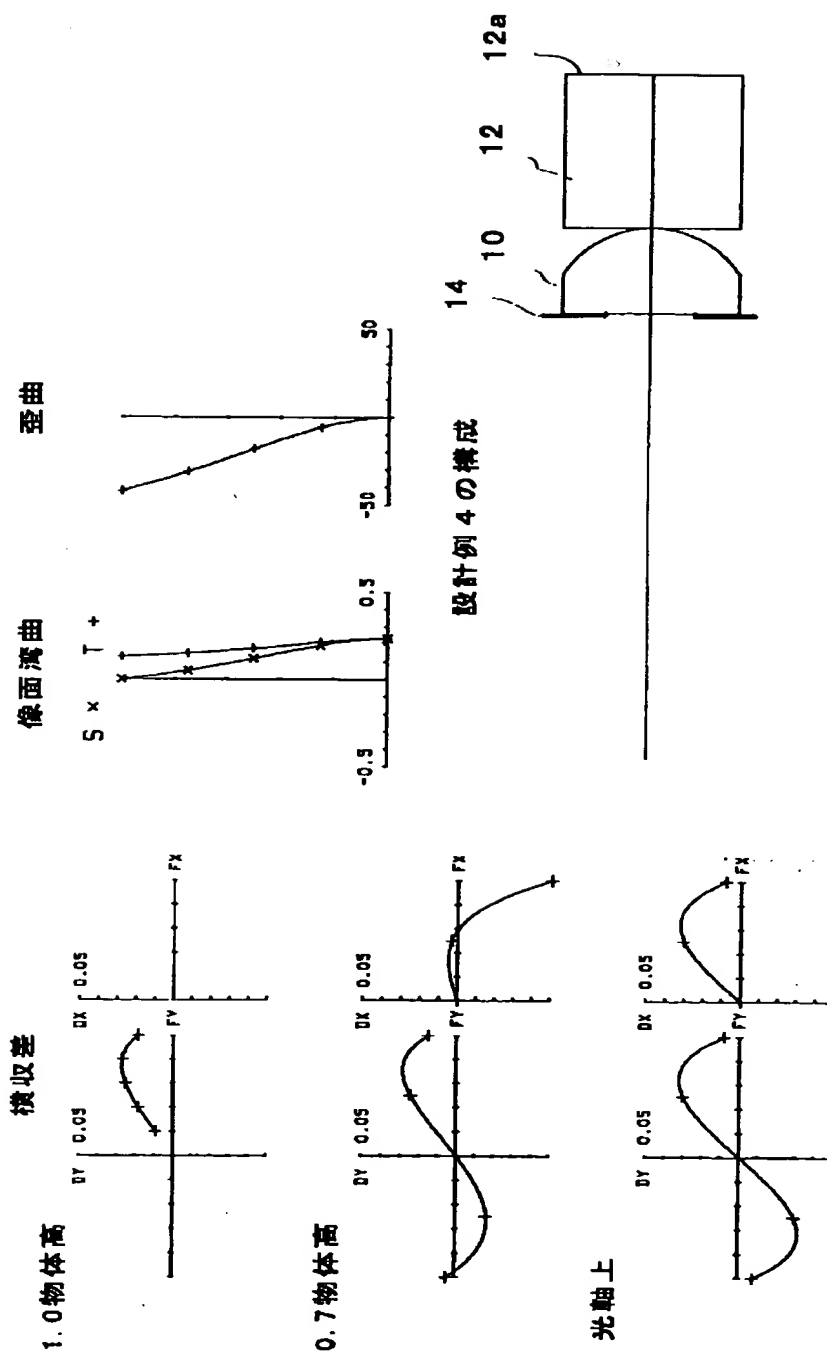
【図5】



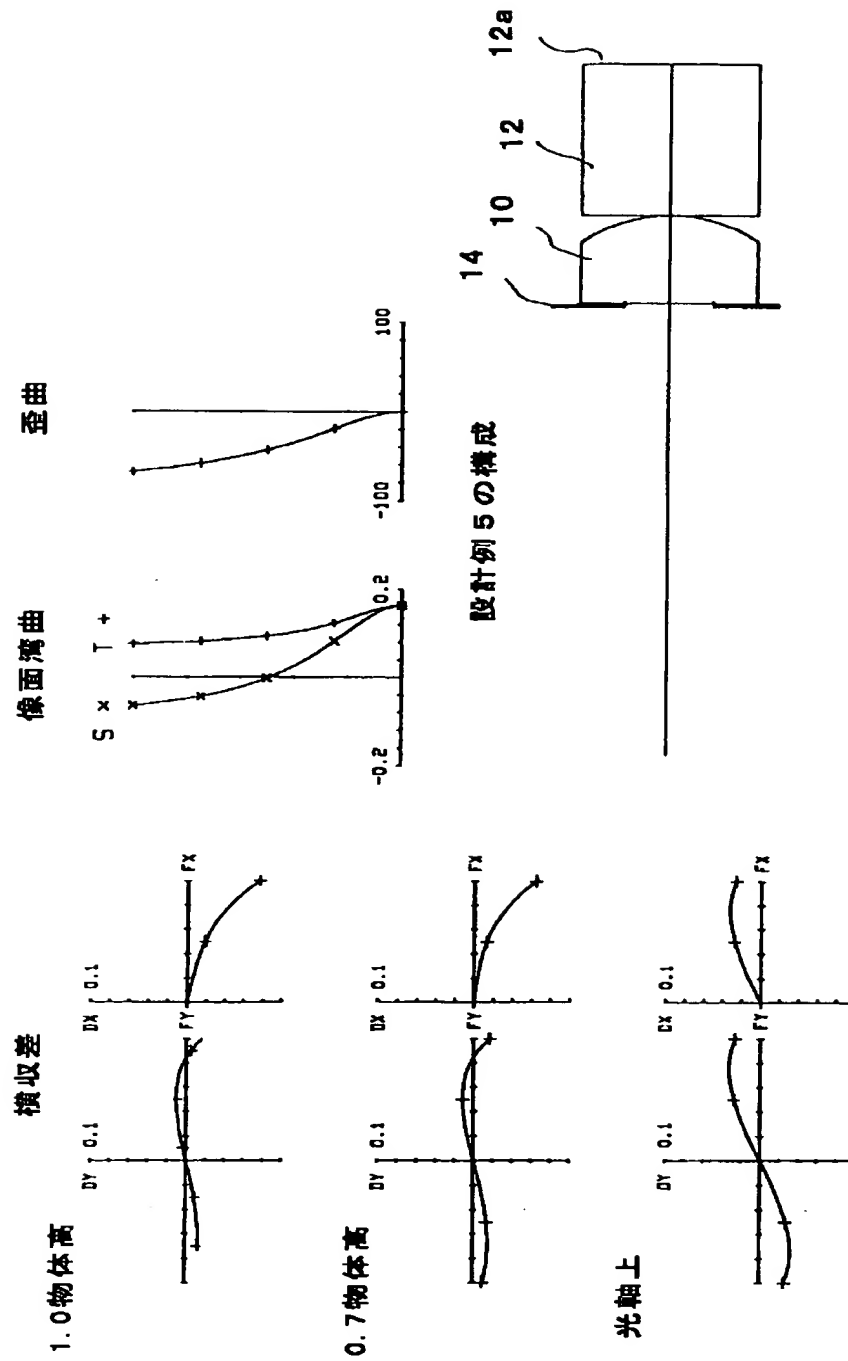
【図6】



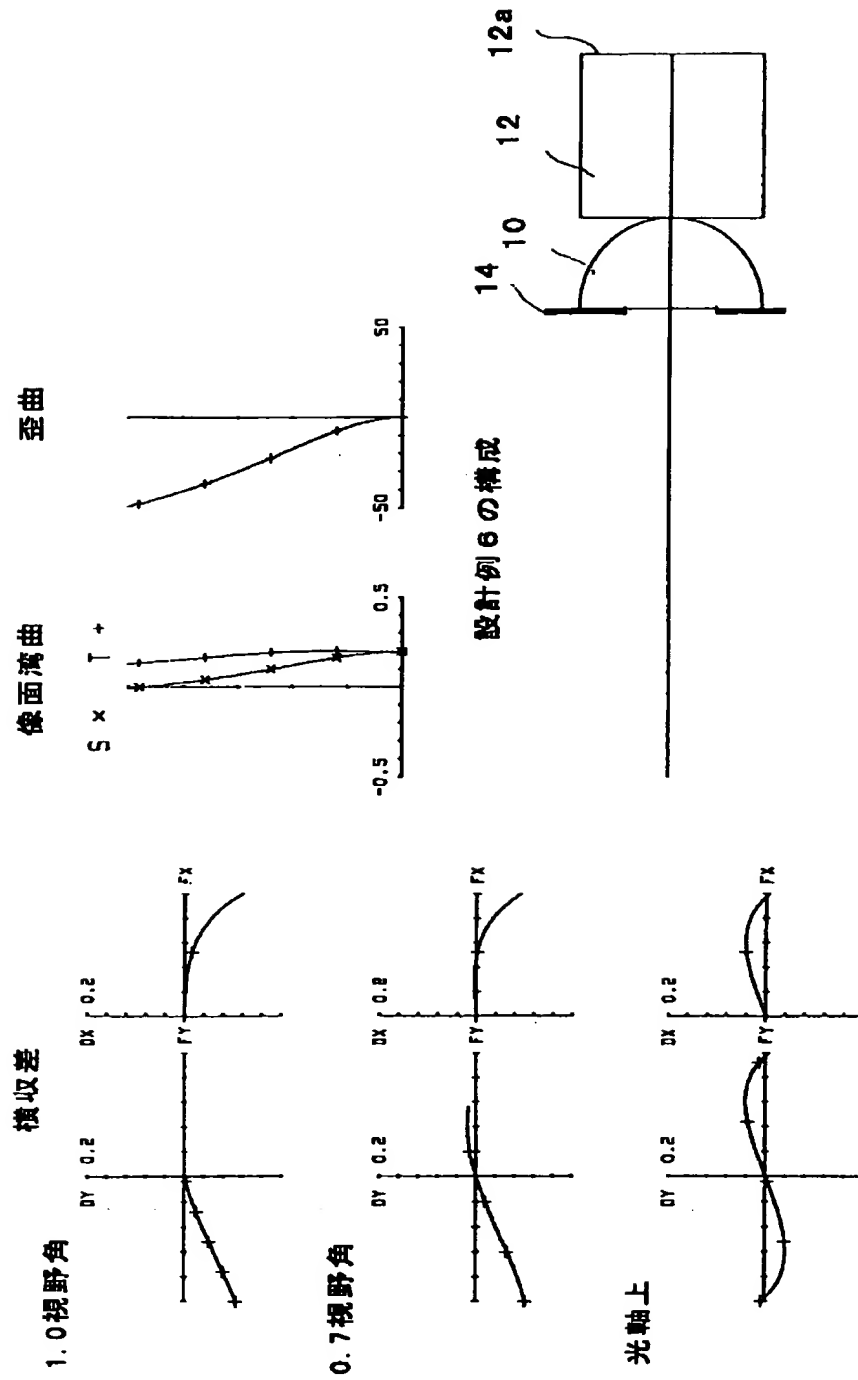
【図7】



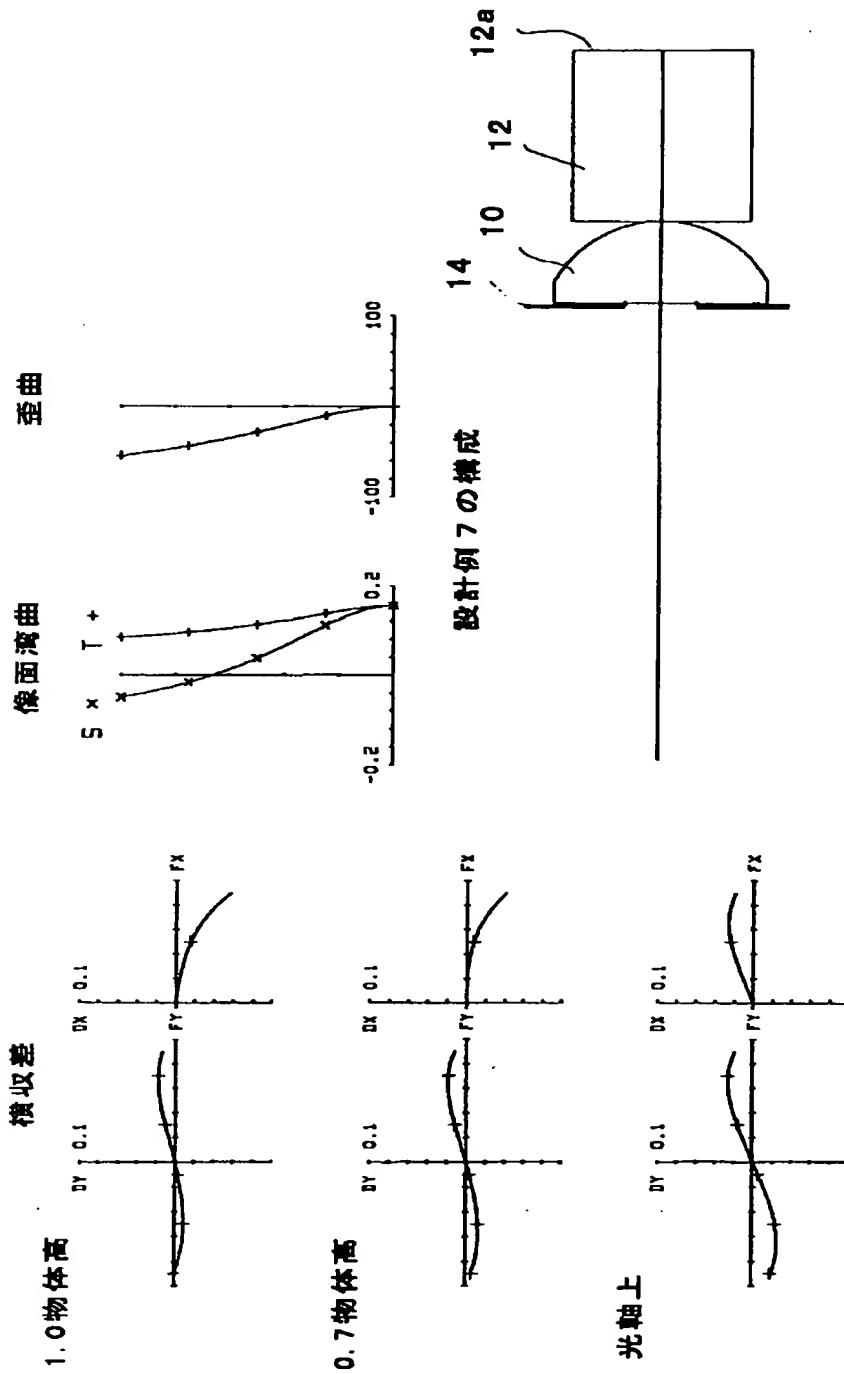
【図8】



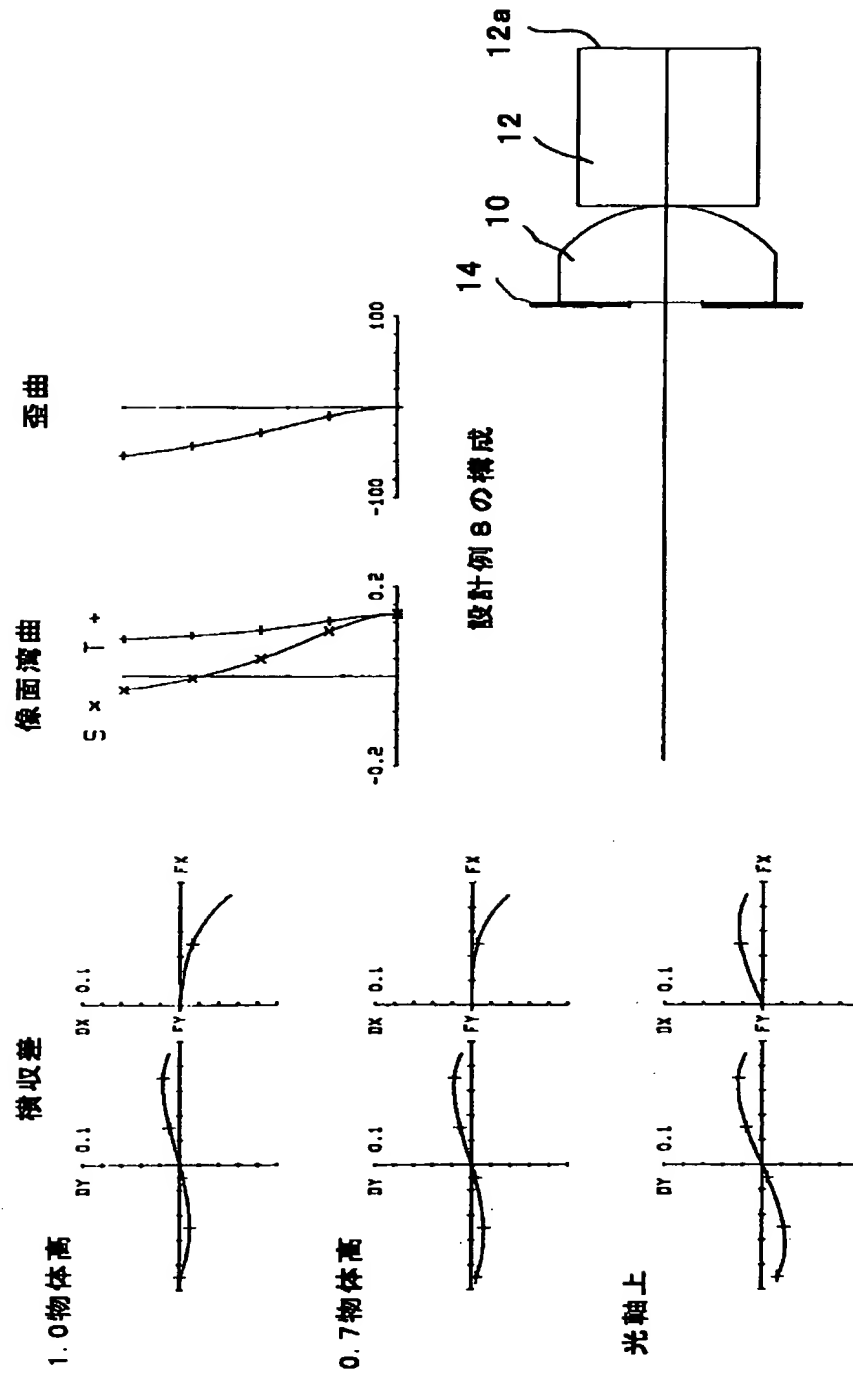
【図9】



【図10】

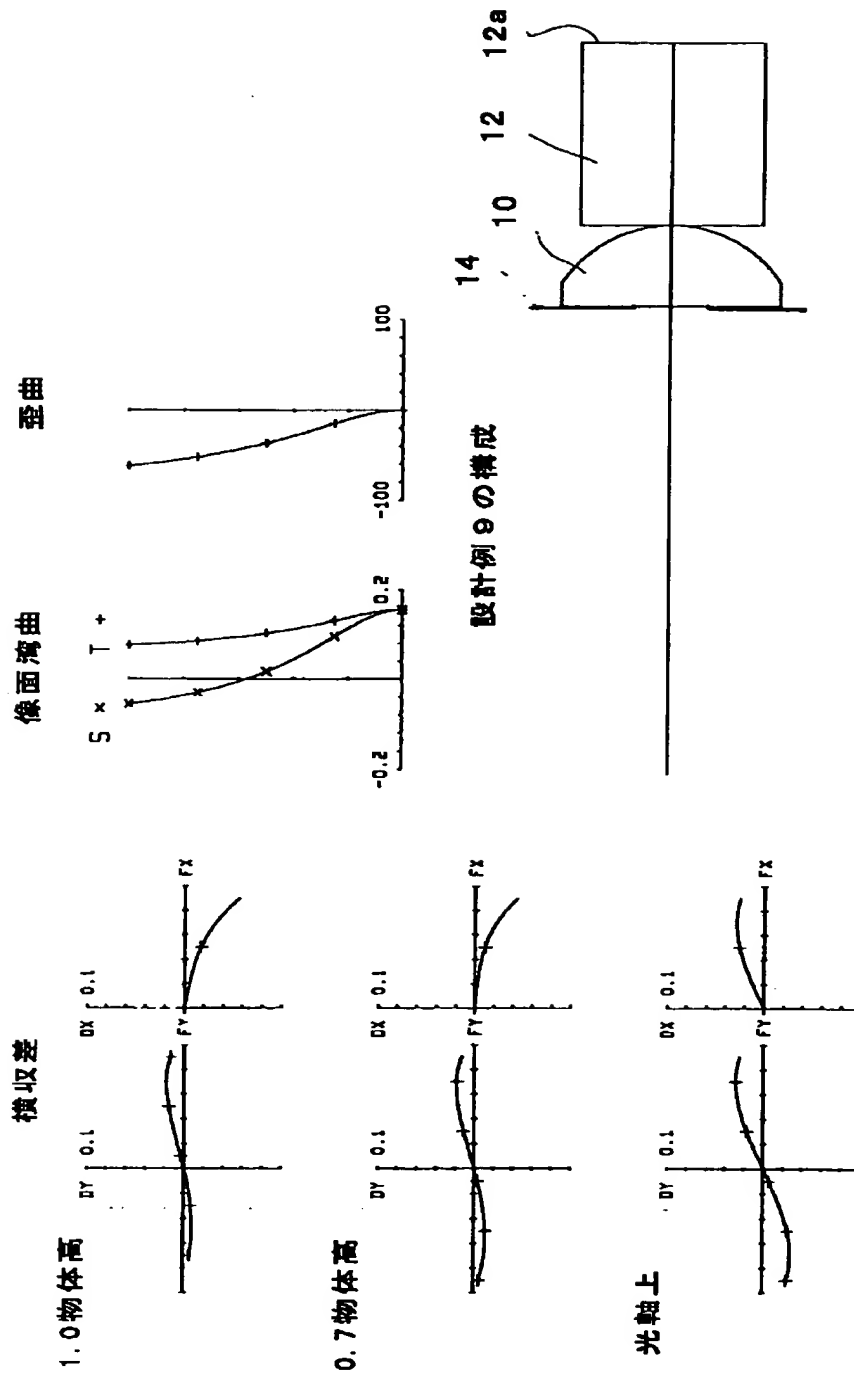


【図11】

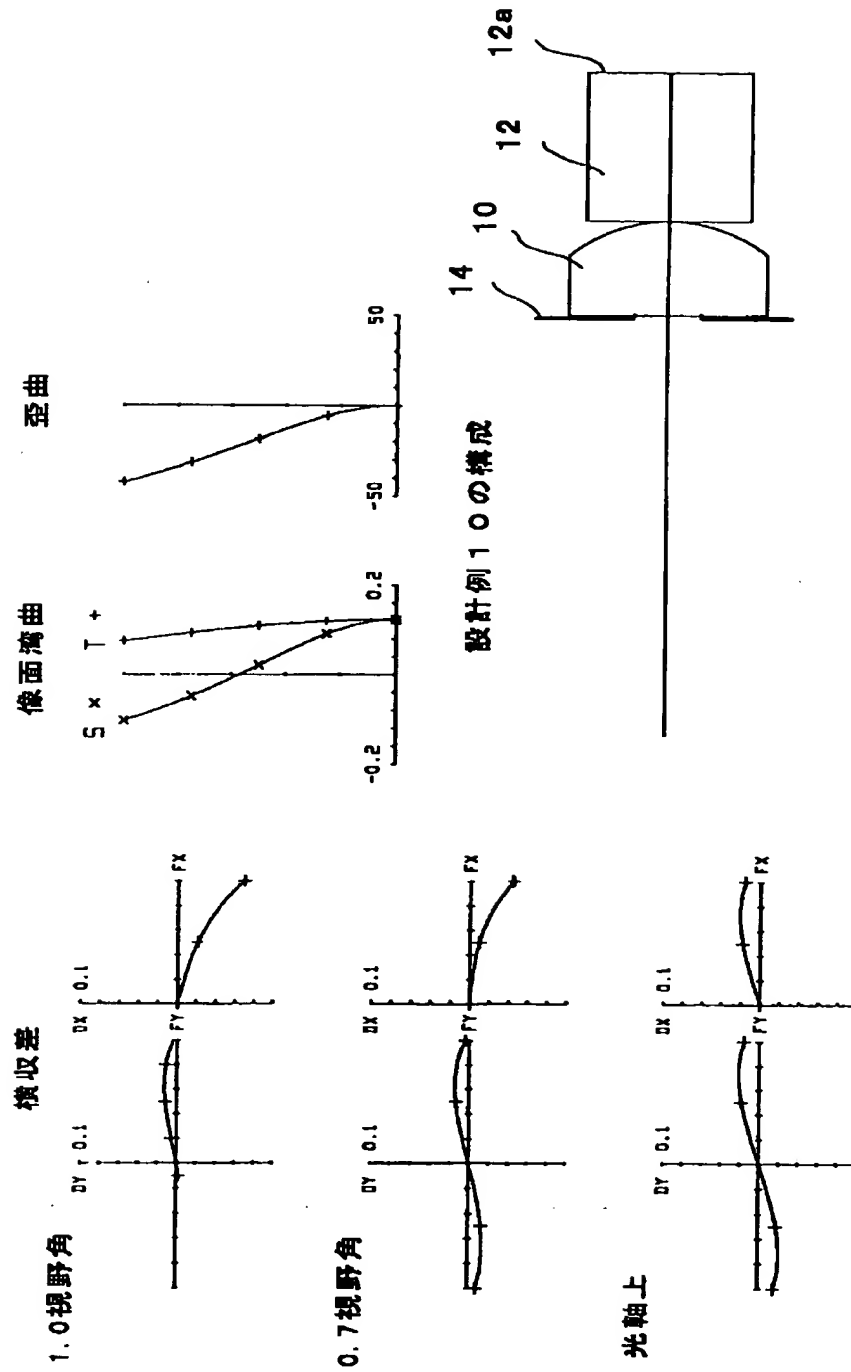




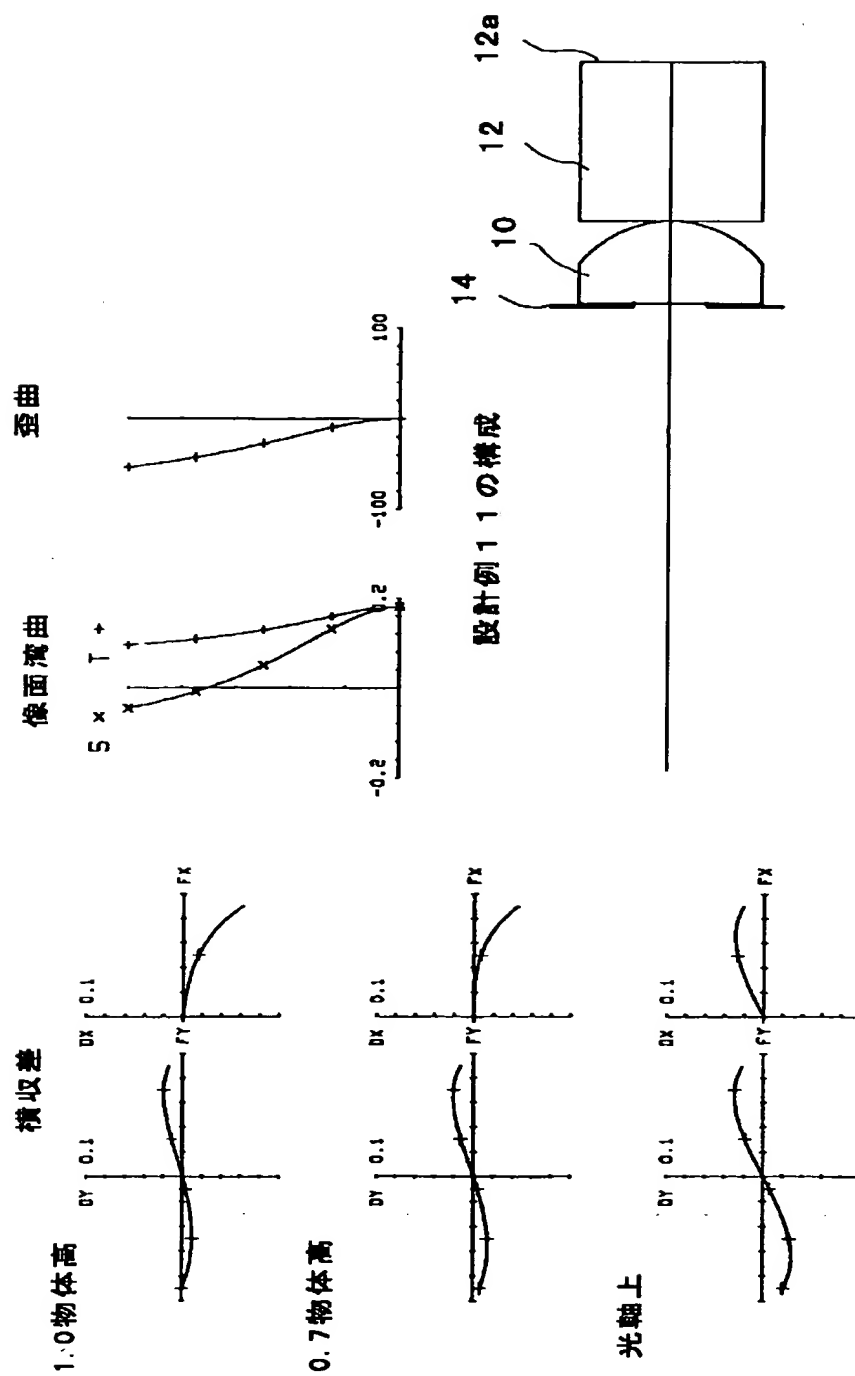
【図12】



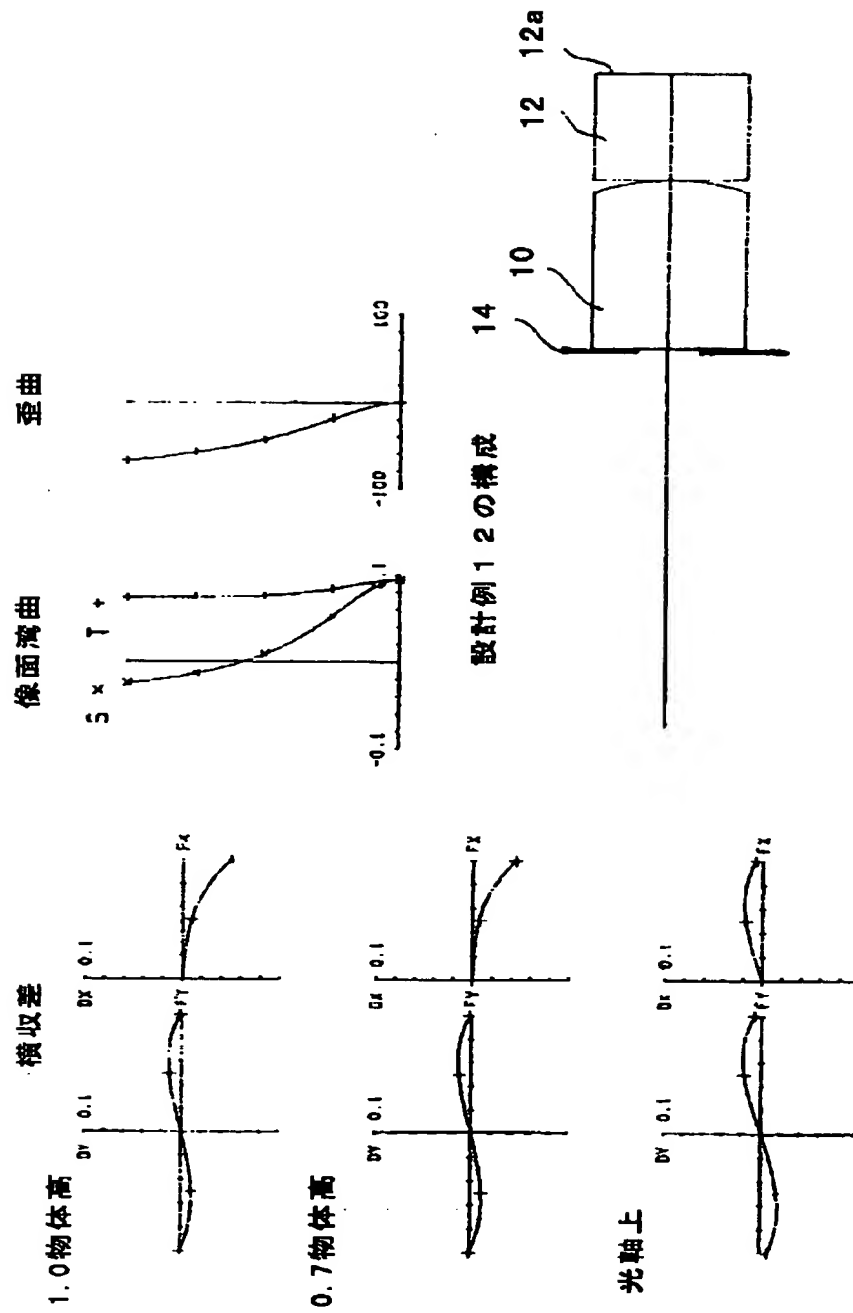
【図13】



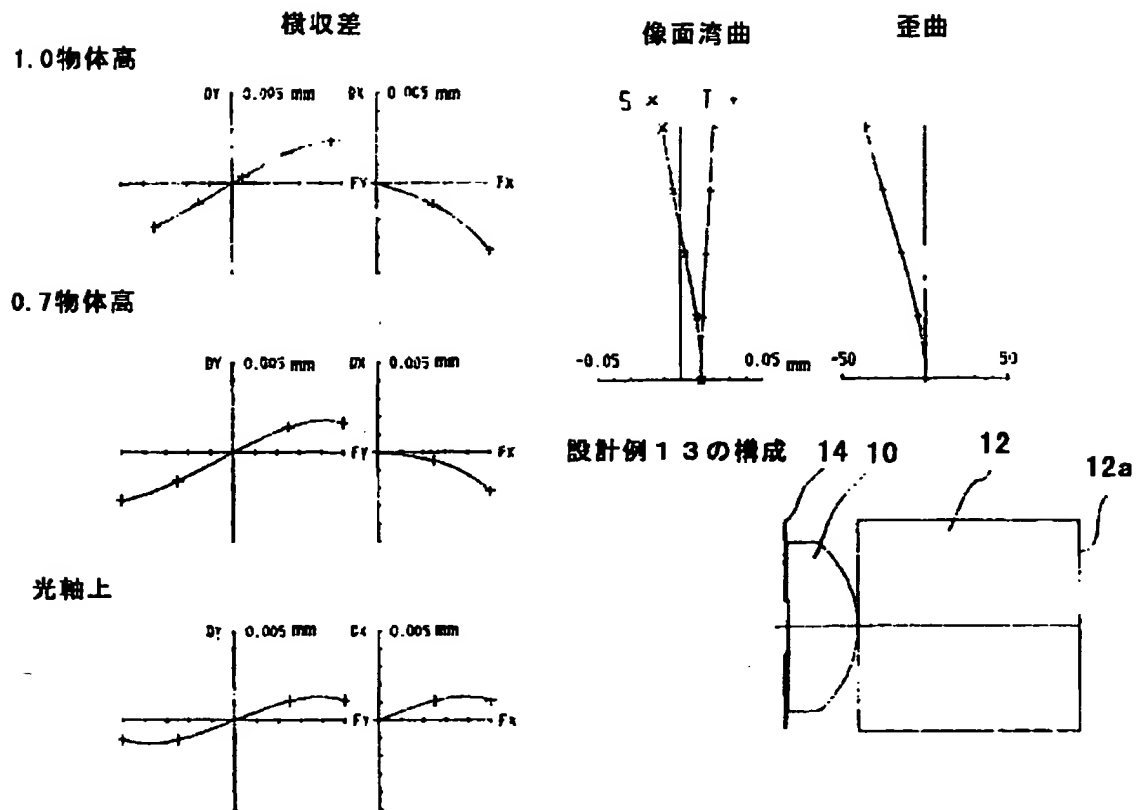
【図14】



【図15】



【図16】



【図17】

